

**Igor LEŠŠO¹, Patrik FLEGNER², František KREPELKA³, Milan
ŠUJANSKÝ⁴, Erik ŠPAK⁵**

**ŠPECIFIKÁCIA PRÍZNAKOV PROCESU ROZPOJOVANIA HORNÍN
ROTAČNÝM VRTANÍM PRE ÚČELY RIADENIA PROCESU**

**SPECIFICATION OF THE CHARACTERISTICS OF ROCK DISINTEGRATION BY
ROTARY DRILLING FOR THE PURPOSE OF PROCESS CONTROL**

Abstrakt

Předmětem článku je výzkum vlastností koherentního vibro-akustického signálu, který je vyvolán během separace horninového masívu metodou rotačního vrtání. Cílem je výzkum možností využití tohoto signálu jako součást informačního zdroje pro identifikaci procesu vrtání z pohledu účinnosti daných parametrů (tlak, otáčky, přítlak) za daných geotechnických podmínek. Zkoumány jsou možnosti procesu rozpoznávání metodou vektorové kvantifikace.

Abstract

The subject of the paper is investigation of the properties of concurrent vibro-acoustic signal in the process of rock massif separation with the method of rotary drilling. The aim is to investigate the possibilities of using this signal as an integrating information source for the purposes of identification of the process of separation from the viewpoint of efficiency of the set mode (pressure, revolutions, indentor) under current geotechnical conditions. It is investigated the possibility of the process status recognition by method of vector quantisation.

Úvod

Rozpojovanie hornín rotačným vrtaním patrí medzi kľúčové procesy nie len pri banskej činnosti, ale aj v širších oblastiach geotechnológií. Teoretický výskum rozpojovania hornín rotačným vrtaním a následné experimenty na vrtnom stande Ústavu

¹ prof. Ing. Igor Leššo, CSc., TU v Košiciach, FBERG, Ústav riadenia a informatizáci výrobných procesov, ul. B. Němcovej 3, 040 01 Košice, Slovenská republika, e-mail: igor.lesso@tuke.sk

² Ing. Patrik Flegner, PhD., TU v Košiciach, FBERG, Ústav riadenia a informatizácie výrobných procesov, ul. B. Němcovej 3, 040 01 Košice, Slovenská republika, e-mail: patrik.flegner@tuke.sk

³ host. doc. Ing. František Křepelka, CSc., ÚGT SAV, ul. Watsonova 45, 043 45 Košice, Slovenská republika, e-mail: krepelka@saske.sk

⁴ Ing. Milan Šujanský, Procesná automatizácia, a. s. Košice, e-mail: milan.sujansky@zoznam.sk

⁵ Ing. Erik Špak, ABB Group, Košice

geotechniky Slovenskej akadémie vied ukázali, že existuje optimálny - efektívny režim vrtania z hľadiska mernej spotreby energie w (J/m^3), z hľadiska opotrebovania rozpojovacieho nástroja, ale aj z hľadiska rýchlosti vrtania v (m/s) [1, 2]. Uvedené tri kritéria optimálneho režimu sú splnené približne v jednom (efektívnom) pracovnom režime (optimálne otáčky $-n_{opt}$, optimálny prítlak $-F_{opt}$). Ďalší výskum ukázal, že v blízkosti efektívneho režimu procesu vrtania má sprievodný vibro-akustický signál špecifické identifikovateľné vlastnosti [3, 4]. Z uvedených dôvodov je už niekoľko rokov vyvíjaná snaha o vedecký výskum možnosti využitia sprievodného vibro – akustického signálu pri efektívnom riadení procesu rotačného vrtania horninového masívu.

Autori príspevku sa zaoberajú myšlienkou efektívneho riadenia procesu vrtania hornín, založeného na tomto princípe:

Systém priebežne sníma sprievodný vibro – akustický signál z vrtania horninového masívu a extrahuje z neho vektor príznakov, na základe ktorého metódou vektorového kvantovania rozpoznáva a klasifikuje práve rozpojovanú horninu do jednej z predom definovaných geomechanických tried. Následne nastaví režim vrtania, ktorý bol expertne of-line určený pre danú triedu hornín ako efektívny režim vrtania.

Tento prístup k riešeniu úlohy riadenia procesu vrtania hornín umožňuje vyhnúť sa hľadaniu klasického modelu riadenia, čo by z dôvodu komplikovanosti a stochastičnosti samotného procesu vrtania v horninovom masíve bolo zrejme nereálne.

V prácach [5, 6] autori podrobnejšie popísali uvažovaný systém riadenia procesu vrtania a s využitím príslušného matematického formalizmu popísali princíp klasifikátora hornín na báze vektorového kvantovania. Tiež ilustrovali prvé výsledky výskumu pri hľadaní závislostí medzi vlastnosťami sprievodných vibro – akustických emisií a druhom rozpojovanej horniny a samotným režimom vrtania.

V tomto príspevku autori uvádzajú niektoré nové poznatky z vlastného výskumu vzťahov signál – hornina – režim, kde cieľom je zostaviť vektor príznakov, ktorý by navzájom dostatočne diferencoval jednotlivé triedy hornín. Na takomto vektore príznakov by prebiehala on – line klasifikácia rozpojovaných hornín vo vyššie uvedenom princípe riadenia procesu vrtania.

Definovanie problému

Východiskom pre hľadanie príznakov procesu vrtania je sprievodný akustický a vibračný signál. Vzhľadom na doterajšie skúsenosti v tejto oblasti je možné konštatovať, že pokiaľ sa podmienky procesu vrtania nemenia (režim, geomechanické vlastnosti práve rozpojovanej horniny), signál je stacionárny. Prakticky to znamená, že základnou jednotkou informačného signálu z hľadiska jeho spracovania je jeho jediná realizácia (t. j. postupnosť) o dĺžke n vzoriek. Túto realizáciu informačného signálu označme ako postupnosť vzoriek $\{x_i\}_{i=1}^n$. V práci boli spracovávané realizácie signálov [12] o dĺžke $n=1024$ vzoriek. Snahou bolo skúmať také jednočíselné príznaky charakteru procesu vrtania, ktoré dostatočne citlivo diferencujú tento proces z hľadiska režimu, ale hlavne z hľadiska typu rozpojovanej horniny. Pritom šlo o príznaky, ktoré sa dajú vypočítať z jednej realizácie alebo z postupnosti viacerých za sebou nasledujúcich realizácií informačného signálu. Proces extrakcie j - teho jednočíselného príznaku $p_j \in R$ z realizácie signálu, pre ktorého vzorky platí $x_i \in X$ pre $i=1,2,...,n$, sa môže chápať ako n - rozmerná reálna, resp. komplexná funkcia:

$$p_j = f_j(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1a)$$

Pre popis stavu procesu je potrebných spravidla viacero príznakov. Potom m jednočíselných príznakov $p_j, j = 1, 2, \dots, m$ predstavuje m -zložkový príznakový vektor $\mathbf{p} = (p_1, p_2, \dots, p_m)$, ktorý charakterizuje stav procesu. Vzťah (1a), popisujúci extrakciu príznakov z informačného signálu, má zmysel vyjadriť vektorovou funkciou:

$$\mathbf{p} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) \quad (1b)$$

kedy sme realizáciu signálu $\{x_i\}_{i=1}^n$ usporiadali do vektorovej štruktúry $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$.

Pri použití matematickej abstrakcie je potom možné si predstaviť, že sa proces ako systém pohybuje v m - rozmernom lineárnom vektorovom priestore $V_m(R)$. Tu sa predpokladalo, že $p_j \in R$ pre každé $j=1, 2, \dots, m$. Vtedy ide o nekonečný a spojitý m – rozmerný vektorový priestor, pre ktorý platí $V_m(R) = R^m$. V reálnych podmienkach, kde je informačný signál snímaný snímačmi a digitalizovaný AD prevodníkom s obmedzeným rozlíšením, je tento vektorový priestor príznakov procesu konečný. Jednotlivé príznaky ako zložky príznakového vektora nadobúdajú hodnoty z konečných množín hodnôt.

Je zrejmé, že vo všeobecnosti, a to platí viac menej aj v tomto prípade, že jednotlivé príznaky, majú rozdielne fyzikálne rozmery a rozdielne obory hodnôt. Niektorý príznak môže nadobúdať veľmi veľké hodnoty, iný veľmi malé. Aby pri analýze týchto viacrozmerných dát nedošlo ku skresľovaniu výsledkov z dôvodu rôznych škál parametrov meraní, je potrebné tieto dáta štandardizovať použitím štatistiky odvodené z dát. Na to slúži nižšie uvedený vzorec:

$$p_{jk}^{\text{norm}} = \frac{p_{jk} - \min\{p_{ik}\}_{i=1}^N}{\max\{p_{jk}\}_{k=1}^N - \min\{p_{jk}\}_{k=1}^N} \quad (2)$$

kde p_{jk} je nenormovaný j –tý príznak, vypočítaný z k –tej realizácie signálu, N je počet vyhodnocovaných realizácií signálu, p_{jk}^{norm} je normovaný j –tý príznak, vypočítaný z k –tej realizácie signálu.

Aby bolo možné exaktným spôsobom navzájom odlišovať jednotlivé stavy procesu víťania horniny na základe hodnôt príznakov, bolo nutné zaviesť pre príznakový priestor $V_m(R)$ vhodnú metriku $\rho(\mathbf{p}_x, \mathbf{p}_y)$, ktorá určuje vzdialenosť medzi dvojicou príznakových vektorov $\mathbf{p}_x, \mathbf{p}_y \in V_m(R)$. Funkcia ρ musí vystačiť s aritmetickými operáciami, ktoré sú v lineárnom vektorovom priestore definované, a to je súčin vektora so skalárom, skalárny súčin dvoch vektorov a rovnosť dvoch vektorov. V práci bola použitá klasická euklidovská metrika, pre ktorú platí:

$$\rho_e(\mathbf{p}_x \mathbf{p}_y) = \sqrt{\sum_{j=1}^m (p_{xj} - p_{yj})^2} \quad (3)$$

Tým dostávame metrický príznakový priestor $(V_m(R), \rho_e)$ procesu vŕtania, ktorý sa bude v ďalšom chápať ako príznakový priestor procesu rozpojovania horniny rotačným vŕtaním.

Ako informačný signál, z ktorého boli extraktované jednotlivé jednočíselné príznaky stavu procesu vŕtania, bol použitý signál akustických emisií. Určité experimenty boli prevádzané aj na signáli vibrácií v troch osiach.

Popis experimentov a dosiahnuté výsledky

Jednou z hlavných úloh predmetného experimentálneho výskumu je určenie príznakového vektora \mathbf{p} procesu rozpojovania hornín rotačným vŕtaním. Experimenty boli zatiaľ zamerané na konkrétne štyri príznaky ako možné zložky príznakového vektora procesu vŕtania. Bola prevedená analýza hodnôt týchto príznakov v závislosti na hornine a režime jej vŕtania na experimentálnom vŕtnom stande. Súčasne bolo potrebné s využitím metriky analyzovať diferencovanosť príznakov vo vzťahu k horninám.

Ako príznaky stavu procesu vŕtania boli na základe štúdia literatúry [8, 9] a vlastných experimentov určené tieto parametre sprievodných vibro - akustických emisií ako informačného signálu: p_1 - miera variability – rozptyl časového priebehu signálu, p_2 - L_2 norma časového priebehu signálu, p_3 - L_2 norma spektra signálu a p_4 - energia signálu. Každý z uvedených príznakov bol počítaný vždy z jednej realizácie $\{x_i\}_{i=1}^n$ signálu o dĺžke realizácie $n=1024$ vzoriek. Vzorky signálu boli zosnímané s frekvenciou vzorkovania $f_{vz} = 44\text{kHz}$, Pritom sa výpočet opakoval pre $N=30$ zasebou nasledujúcich realizácií signálu. Následne takto vypočítané hodnoty príznakov boli u každej horniny samostatne znormované podľa vzťahu (2). Týmto spôsobom boli analyzované a navzájom porovnávané sprievodné akustické signály z vŕtania šamotu, tehly, kremeňa, mramoru, vápenca, analyzovaný bol aj hluk vŕtneho standu naprázdno. V nasledujúcom sú uvedené výpočtové vzťahy ore jednotlivé príznaky a dosiahnuté výsledky.

Príznak p_1 - rozptyl realizácie signálu

Rozptyl je najčastejšie používanou mierou variability. Je definovaný ako priemer druhých mocnín odchýliek jednotlivých hodnôt štatistického súboru od aritmetického priemeru:

$$p_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (4)$$

Na obr. 1 je znázornený príznak p_1 vypočítaný z $N=30$ realizácii akustického signálu z rozpojovania všetkých analyzovaných hornín. Z obrázku je možné usúdiť, že najnižší rozptyl má hornina mramor a najvyšší ho má hornina šamot.

Z obr. 1 je možné posúdiť diferencovanosť rozptylu časového priebehu signálu ako príznaku. Najväčšie rozdiely sú medzi šamotom, kremeňom a mramorom.

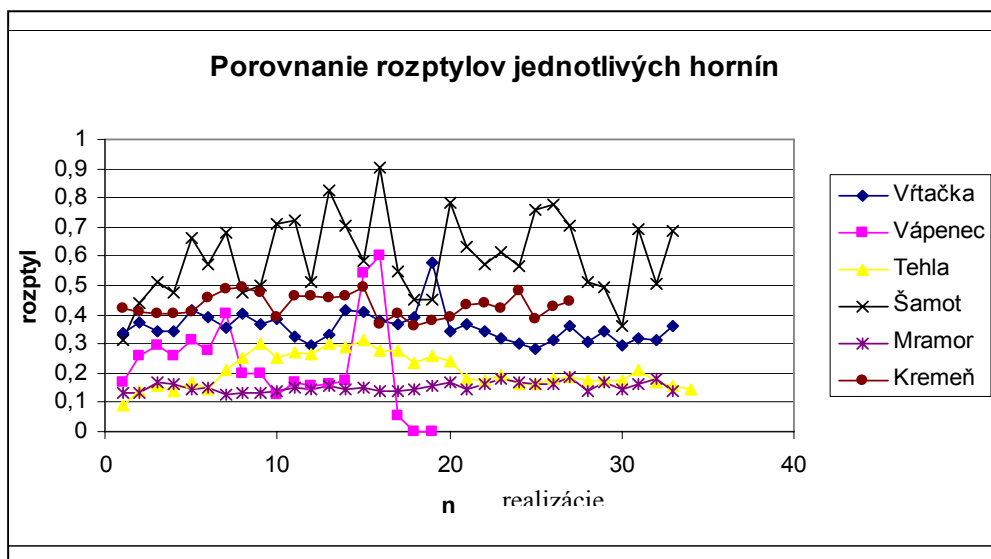
Príznak p_2 - L_2 norma z časového priebehu signálu (L_2x)

Pri návrhu druhého analyzovaného príznaku p_2 sa vychádza z predstavy vektora, ktorého zložkami sú jednotlivé vzorky realizácie signálu $\{x_i\}_{i=1}^n$. Pre aritmetický vektor je definovaná tzv. L_p norma vektora x :

$$L_p(\mathbf{x}) = \left(\sum_{i=1}^n |x_i|^p \right)^{\frac{1}{p}} = \underbrace{(\mathbf{x}, \mathbf{x}, \dots, \mathbf{x})^{1/p}}_{p\text{-krát}}, \quad p \in (0, \infty). \quad (5)$$

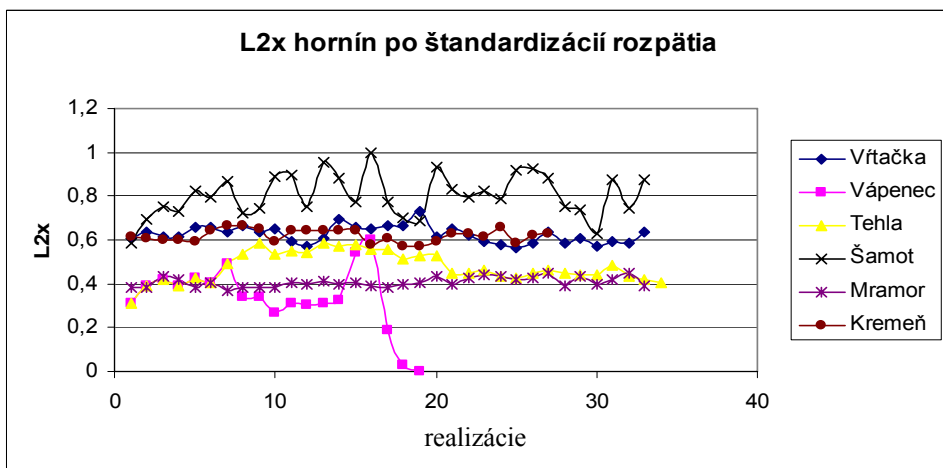
Konkrétne ako príznak p_2 bola definovaná L_2 norma vektora x ($p=2$), ktorého zložkami boli vzorky realizácie signálu:

$$p_2 \equiv L_2x = |\mathbf{x}| = \left(\sum_{i=1}^n x_i^2 \right)^{\frac{1}{2}} = (\mathbf{x}, \mathbf{x})^{\frac{1}{2}}. \quad (6)$$



Obr. 1 Hodnoty príznaku p_1 - rozptyl, vypočítané z $N=30$ realizácií všetkých hornín

Na obr. 2 je znázornený príznak p_2 vypočítaný z cca 30 realizácií akustického signálu z rozpojovania všetkých analyzovaných hornín. Z obrázku je možné usúdiť, že najnižšiu hodnotu L_2 normy má opäť hornina mramor a najvyšší ho má hornina šamot. Vřtačka a kremeň majú hodnoty tejto miery vzájomne blízke, avšak dostatočne diferencovateľné od ostatných hornín.



Obr. 2 Hodnoty príznaku p_2 - L_2 norma N realizácií všetkých hornín

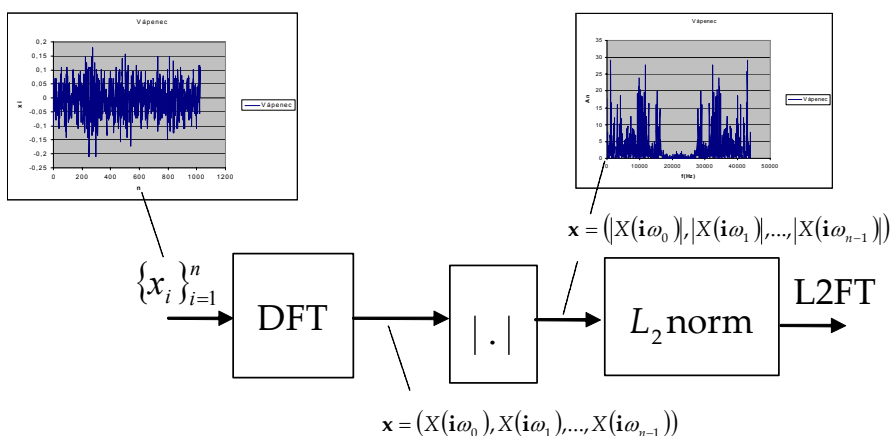
Príznak p_3 - L_2 norma zo spektra signálu (L2FT)

V tomto prípade počítame L_2 normu z amplitúdového frekvenčného spektra jednej realizácie signálu. Teda príznak p_3 sa počíta ako L_2 norma z vektora $\mathbf{x} = (|X(\mathbf{i}\omega_0)|, |X(\mathbf{i}\omega_1)|, \dots, |X(\mathbf{i}\omega_{n-1})|)$, kde $|X(\mathbf{i}\omega_k)|$, $k=0,1,2,\dots,n-1$ je amplitúda frekvenčného spektra realizácie signálu odpovedajúca uhlovej frekvencii $\omega_k = 2\pi k f_{vz} / n$ (rad/s). Frekvenčné spektrum bolo počítané z realizácie signálu. Frekvencia vzorkovania sprievodného akustického signálu bola $f_{vz} = 44$ kHz. Vypočet príznaku p_3 sa teda prevádza podľa vzťahu

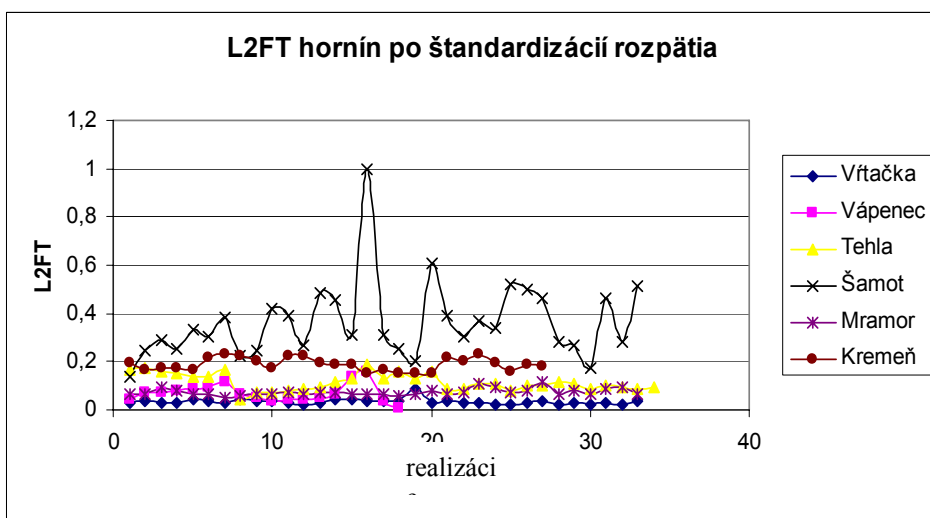
$$p_3 \equiv \text{L2FT} = \sqrt{\sum_{k=0}^{n-1} |X(\mathbf{i}\omega_k)|^2}. \quad (7)$$

Pre názornosť je na obr. 3 zobrazený postup pri výpočte hodnoty príznaku p_3 z jednej realizácie signálu.

Na Obr. 4 je znázornený príznak p_3 vypočítaný z 30 realizácií akustického signálu z rozpojovania všetkých analyzovaných hornín. Z obrázku je možné usúdiť, že najnižšiu hodnotu L_2FT má vřtačka, z hornín je to opäť mramor a najvyššiu hodnotu L_2FT má hornina šamot.



Obr. 3 Postup pri výpočte hodnoty príznaku p_3 - L2 norma z amplitúdového spektra realizácie signálu



Obr. 4 Hodnoty L2FT N realizácií všetkých hornín

Príznak p_4 - energia signálu

Štvrtým príznakom p_4 je energia sprievodného akustického signálu. Energia signálu je daná súčtom kvadrátov vzoriek signálu $\{x_i\}_{i=1}^n$:

$$p_4 \equiv E = \sum_{i=1}^n x_i^2 \quad (8)$$

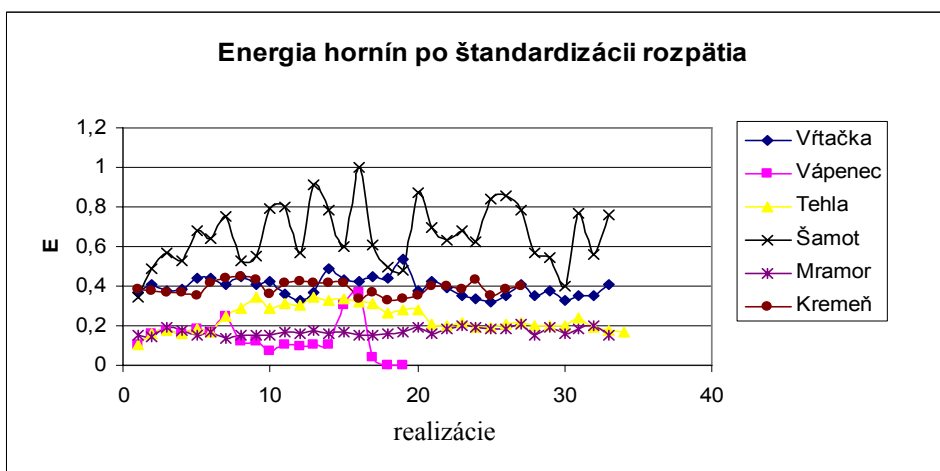
Na obr. 5 je znázornený príznak vypočítaný z 30 realizácií akustického signálu z rozpojovania všetkých analyzovaných hornín. Z obrázkov je možné usúdiť, podobne ako v predchádzajúcom prípade, že najnižšiu hodnotu energie má opäť hornina mramor a najvyšší ho má hornina šamot. Vŕtačka a kremeň majú hodnoty tejto miery vzájomne blízke, avšak dostatočne diferencovateľné od ostatných hornín.

V ďalšej časti výskumu bola overovaná vzájomná nezávislosť uvedených štyroch príznakov procesu vŕtania. Dvojmerná analýza dvojíc príznakov však nakoniec neočakavane preukázala silnú koreláciu medzi príznakom p_2 -L2x a príznakom p_2 -E. Ako dôvod tejto silnej závislosti bola stanovená skutočnosť, že obidva výpočtové vzorce (6) a (8) majú zhodný základ.

Na nasledujúcom obr.6 sú znázornené polohy príznakových vektorov v príznakovej rovine (L2x, L2FT), a to vypočítané z cca 30 realizácií z akustického signálu všetkých šiestich hornín. Vidíme, že jednotlivé horniny majú svoj vymedzenú časť príznakového priestoru, avšak hranica medzi nimi nie je ostrá. Obrázok súčasne poukazuje aj na určitú mieru závislosti medzi príznakom L2X a L2FT, čo tiež môžeme považovať za určitý výsledok práce. V tomto smere zrejme zohráva úlohu skutočnosť, že časový priebeh signálu a jeho spektrum sú rovnocenné a navzájom transformovateľné charakteristiky toho istého procesu. Aj keď ich číselná podoba v štruktúre vektor, z ktorého sa počíta L2norma, je rozdielna.

Pre lepšie posúdenie diferencovateľnosti hornín pri použití definovaného príznakového vektora, boli vypočítané ťažiská (centroidy) zhlukov realizácií pre každú horninu:

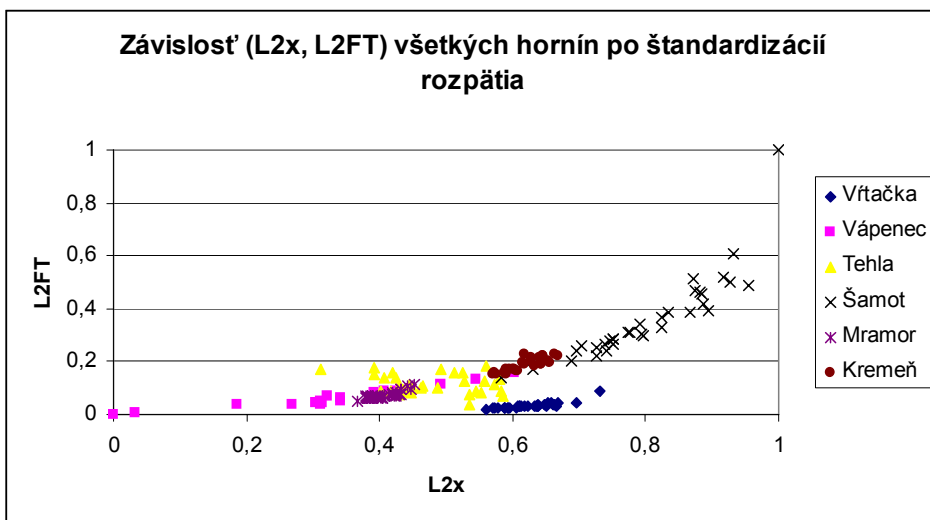
$$x_{1T} = \frac{\sum_{i=1}^N E_i}{N} \quad x_{2T} = \frac{\sum_{i=1}^N L2x_i}{N} \quad (9)$$



Obr. 5 Hodnoty príznaku p_4 - energia realizácie signálu (30 realizácií) všetkých hornín

Výsledok je na obr.7. Z obrázka je vidieť, že diferencovateľnosť je dostatočná, a to zvlášť, ak by sa definovali tri triedy hornín. Hranice medzi triedami hornín sú zrejme neostré.

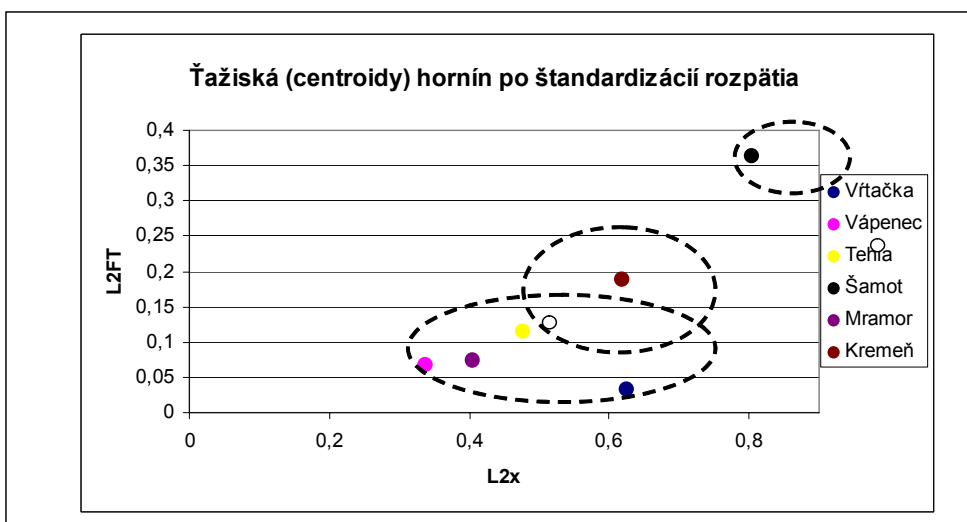
Na záver sú na obr. 8 uvedené zhluky príznakových vektorov procesu vrtania analyzovaných hornín v trojrozmernom príznakovom priestore (L2FT, L2x, E). Je badateľná dostatočná diferencovateľnosť hornín, avšak tiež značná vzájomná závislosť, ktorej bude potrebné v ďalšom výskume venovať pozornosť.



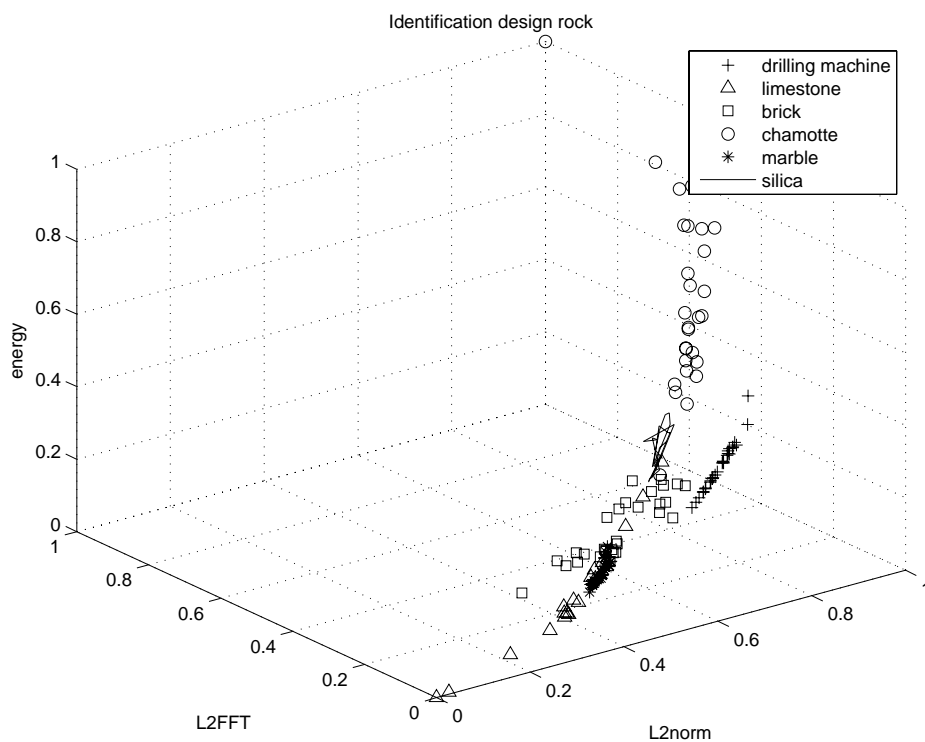
Obr. 6 Dvojrozmerná analýza všetkých hornín v dvojrozmernom príznakovom priestore (L2FT, L2x)

Záver

Príspevok naväzuje na prácu [7] a rozoberá otázku identifikácie príznakov procesu [8, 9, 10] rozpojovania horninového masívu metódou rotačného vrtania. Konečným cieľom výskumu je algoritmus riadenia procesu vrtania tak, aby bol režim vrtania horniny efektívny z hľadiska spotreby mernej energie. Východiskom výskumu je analýza sprievodného vibro – akustického signálu. Výsledky experimentov na piatich horninách a na chode vŕtneho standu naprázdno svedčia o dostatočnej diferencovateľnosti navrhnutých príznakov vo vzťahu ku vhodne zvoleným triedam hornín z hľadiska geomechaniky. Zvýšenú pozornosť je potrebné venovať vzájomnej nezávislosti jednotlivých navrhovaných príznakov. Najlepšie výsledky boli preukázané pri príznakoch procesu vrtania, definovaných ako L2 norma vektora vzoriek signálu a L2 norma vektora Fourierových koeficientov amplitúdového frekvenčného spektra signálu. Ďalší výskum je momentálne smerovaný k hľadaniu ďalších príznakov, aby rozmer príznakového priestoru procesu vrtania hornín bol dostatočný a umožnil vytvoriť v procese učenia [11] dostatočný počet tried hornín z hľadiska im odpovedajúceho efektívneho režimu vrtania.



Obr. 7 Zobrazenie možných tried hornín podľa ťažísk zhľukov príznakových vektorov, počítaných z jednotlivých realizácií sprievodného akustického signálu pri vŕtaní analyzovaných hornín



Obr. 8 Polohy (zhľuky) príznakových vektorov procesu vŕtania šiestich hornín v trojrozmernom príznakovom priestore (L2FFT, L2x, E).

Literatúra

- [1] SEKULA, F. *Súbor prác z oblasti výsledkov výskumu rozpojovania hornín*. Habilitačná práca, FBERG TU v Košiciach, Košice 1992.
- [2] SEKULA, F. & GREXOVÁ, S. Monitorovanie rozpojovania pri plnoprofilovom razení liniových podzemných diel. *Acta Montanistica Slovaca*, no. 6 (2001).
- [3] LEŠŠO, I. Teória signálov pre priemyselnú informatiku ES/AMS. Košice, 2004, ISBN: 80-8073-186-1.
- [4] LEŠŠO, I., KREPELKA, F., FLEGNER, P. & PANDULA, B. Research of Methods for Quality Evaluation of Rocks Desintegration by Rotary Drilling. *Transactions of the VSB – Technical university of Ostrava*, Civil engineering series, ISSN 1213-1962, vol. VII, 2/2007, pp. 165 – 174.
- [5] LEŠŠO, I., FLEGNER, P., PANDULA, B. & HOROVČÁK, P. New Principles of Process ontrol in Geotechnics by Acoustic Methods. *Metallurgy*. Vol. 46, no. 3, 2007, pp. 165-168. ISSN 0543-5846.
- [6] LEŠŠO, I. et al. Výskum metód zabezpečenia kvality procesu rozpojovania hornín rotačným vrtaním. *Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské - Technické univerzity Ostrava*, Řada stavební. Vol. 7, no. 2/2007, pp. 165-174. ISSN 1213-1962.
- [7] LEŠŠO, I. et al. Výskum možnosti aplikácie metódy vektorového kvantovania pri efektívnom riadení procesu rozpojovania hornín rotačným vrtaním. *Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské - Technické univerzity Ostrava*, Řada stavební. Vol. 8, no. 2/2008, pp. 115-128. ISSN 1213-1962.
- [8] PSUTKA, J. et al. *Mluvíme s počítačem česky*. ACADEMIA, Praha, 2006. ISBN 80-200-1309-1.
- [9] KALÁB, Z., ČASTOVÁ, N. & LYUBUSHIN, A. A. Contribution to Application of the Automatic Classification of Seismological Signals. In *Documenta Geonica*. ÚGN AVČR, Ostrava, pp. 48 – 58.
- [10] PANDA, A. & PANDOVÁ, I. Statistical Process Control. Principles of Statistics. *Transactions of the Universities of Košice*. No. 2/2000, TU Košice, 2000, pp.20-23, ISSN 1335-2334.
- [11] GERSHO, A. & GRAY, R. M. *Vector Quantisation and Signal Compression*. Springer, 1992, ISBN 978-7923-9181-4.
- [12] VISKUP, J. & PANDULA, B. Apreciation of Seismic Effect of Liquidation of Ammunition and Exposives by Detonation. *Transactions of the VSB – Technical university of Ostrava*, Civil engineering series. Vol. 2/2008, pp. 325 – 333.

Oponentní posudek vypracoval:

Doc. Ing. Karel Vojtasík, CSc., VŠB – Technická univerzita Ostrava, FAST

